

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 8 月 23 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500015

研究課題名（和文） 将来の計算機構としての可逆コンピューティングとその体系化

研究課題名（英文） Reversible Computing as a Future Computing Mechanism and Its Theoretical Systematization

研究代表者

森田 憲一（MORITA KENICHI）

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00093469

研究成果の概要（和文）：

物理的可逆性を反映した計算パラダイムである可逆コンピューティングは、微視的レベルでの物理的性質を直接的に利用した将来の計算機構を開発する際の鍵となる。本研究では、可逆論理素子、可逆論理回路、可逆チューリング機械、可逆セルオートマトンなどの可逆計算機構を理論的に探究してそれらの性質や計算能力を解明し、理論を体系化した。そして、この領域には従来にはない斬新な計算モデルや論理素子、計算機構の方法があり得ることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Reversible computing is a paradigm of computation that reflects physical reversibility. It will become important when we develop future computing systems that directly utilize microscopic physical phenomena for their logical operations. In this study, we investigated fundamental properties and computational capabilities of reversible logic elements, logic circuits, Turing machines, cellular automata, and other reversible computing models. We then systematized the obtained results in a theory of reversible computing. We also showed that in this research field there exist very unique and novel computing models, logic elements, and architectures, which cannot be seen in the conventional computing systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：理論計算機科学

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：可逆計算，可逆論理素子，可逆論理回路，可逆チューリング機械，可逆セルオートマトン，物理的可逆性

1. 研究開始当初の背景

物理学における可逆性原理は、物質の微視的な挙動を記述する諸法則の中でも大変重要な意味を持っている。このため、原子・分子などのレベルで起こる物理現象を直接的

に演算に用いて高集積度のコンピュータを構成しようとしたとき、可逆性は避けて通れない問題となる。これはまた、計算におけるエネルギー消費の問題に深く関わっているだけでなく、量子コンピューティングの基礎

になっていることも知られている。可逆コンピューティングはこのような問題を扱うために考えだされた理論的枠組みであり、従来の（非可逆な）計算システムとは大きく異なる基本原理や構成手法を持つことが過去の研究から判明している。それゆえ今後、この理論をさらに深く研究するとともに、将来有用となる斬新な考え方を体系化することが求められている。

2. 研究の目的

本研究は、可逆コンピューティングを、物理モデル、論理素子、計算システムなど、マイクロからマクロに至るまでの各レベルの計算モデル、およびそれらの相互関係について研究し、従来型の計算モデルにはない新しい計算原理の発見とその特質の解明を目指すものである。特に、どれほど単純な可逆的素過程から万能な計算システムが構成できるか、またそれに適した可逆コンピュータのアーキテクチャはどのようなものかを明らかにするとともに、理論の体系化を行う。可逆コンピューティングは、自然界の現象を手本にしているので自然計算 (Natural computing) の一分野と考えられる。自然から学んだものをどのようにして再び自然の中で実現するかの問題も含めて計算機構と自然界との関わりを包括的に研究することにより、実現可能性についての手掛りを得ることも目指している。

3. 研究の方法

本研究においては次の4課題を設定し、それぞれについて研究を行った。

- (1) 2状態可逆論理素子の万能性
 - (2) 可逆チューリング機械およびそれに関連する可逆計算モデルの計算能力
 - (3) 可逆セルオートマトンの性質と万能性
 - (4) 可逆コンピューティング理論の体系化
- これらの課題は可逆論理素子や可逆計算の諸モデルの性質や能力を理論的に明らかにしようとするものである。

(1)では、無限に多く存在する2状態の可逆論理素子のすべてについて、それが万能性を有する（つまり任意の可逆順序機械を構成できる）のか、非万能なのかを解明することを目指している。特に、万能な素子でどれほど単純なものが存在するのかを明らかにする。理論的成果を得るのが目的であるが、素子間のシミュレート/被シミュレートの関係はコンピュータによる探索が必要であり、それを含めて大学院生と共同で研究を進める。

(2)では、補助記憶量が制限されたチューリング機械や、それに対応する計算モデルの能力が、可逆性制約の付加によってどう影響されるのかの問題を研究する。これにより、有用な可逆計算モデルを見出す。理論が主体の

研究であるが、理論を作り上げる際に、コンピュータシミュレーションも併用して行う。

(3)では、計算万能性を有する1次元可逆セルオートマトンの状態数をどれだけ少なくできるかを研究する。これにより、どれほど単純な可逆的素過程から万能性が発現するかを探る。これも理論が主体の研究だが、希望の可逆セルオートマトンをうまく設計できるか否かが鍵となるので、設計の際のコンピュータシミュレーションが不可欠となる。

(4)では理論の体系化を試みる。可逆コンピューティングは、マイクロからマクロに至るまで、何レベルかの層を形成しており、また、各レベルの中においても多くの計算モデルが提案されている。従って、各レベル内の成果だけでなく、レベル間の関係も含めて、全体を体系化すべき状況にある。本研究では、可逆コンピューティングの理論を整理・体系化し、単行本としてまとめ、出版する。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に挙げた各課題について研究して得た成果を以下に詳述する。

(1) 2状態可逆論理素子の万能性

従来の非可逆な論理回路の設計理論においては、論理関数を実現するゲートと、フリップフロップ等の記憶素子の2種類の素子を用い、論理的操作と記憶操作を分離して設計する方法がとられていた。そして可逆論理回路の理論でも当初はこの方法が踏襲されていた。しかしながら、可逆論理回路の場合には「記憶付き論理素子」(reversible logic element with memory, RLEM) が有用であることが明らかになってきた。その最大の理由は、ある種のRLEMを用いると、可逆チューリング機械や可逆順序機械が非常に斬新な方法でしかも簡潔に構成できることにある。ロータリー素子(Morita, 2001)と呼ばれるRLEMはそのような素子の代表的な例であり、1ビットの記憶（従って2つの状態）と、4本の入出力線をもつ。図1のように、2つの状態は棒の向きによって区別され、棒に平行に粒子状の信号が入ると信号は直進して棒の向きは変わらず、棒に垂直に信号が入ると信号は右折して棒の向きも変わる。ロータリー素子を用いると任意の可逆チューリング機械が簡潔に構成できる(図2)ので、この意味でこの素子は万能性を有する。

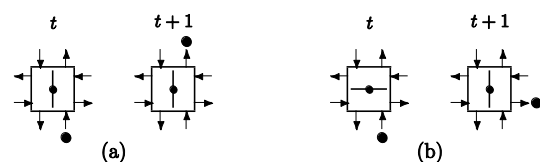


図1. ロータリー素子の動作。(a)信号と棒が平行な場合と、(b)垂直な場合。

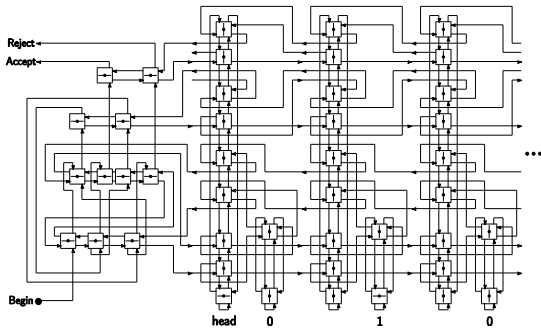


図 2. ロータリー素子で構成された可逆チューリング機械の例 (Morita, 2001).

各 4 本の入出力線をもつロータリー素子は、4 記号の RLEM の 1 つである。一般に k 記号の RLEM は $2k!$ 種類存在するので、それに $0 \sim 2k! - 1$ の番号を系統的に付け、 n 番目の素子を RLEM $k \cdot n$ で表す。 k に制限をおかなければ RLEM は無限個存在するが、その中でどれが万能で、どれが非万能かを明らかにすることは非常に重要な問題である。

この問題については、2008 年度以前にも一部の RLEM についてその万能性を示したが、2009~2011 年度の研究により、1 種類の素子(RLEM 2-17)を除き、すべての RLEM の万能性/非万能性が明らかになった。この結果は次のように述べられる。

- k 記号 RLEM の中で非縮退のもの (つまり $k-1$ 記号素子や 1 状態素子と等価ではないもの) は、 k が 3 以上の場合「すべて」万能になる (雑誌論文 6, 10, 学会発表 15)。
- 2 記号 RLEM の中で縮退していないものは RLEM 2-2, 2-3, 2-4, 2-17 の 4 種類だが、それらの内で 2-2, 2-3, 2-4 の 3 種類は非万能である (学会発表 2)。

図 3 は以上の結果を図示したものである。図中の矢印はシミュレート可能を、否定線つき矢印はシミュレート不能を示す。この結果、2 状態可逆論理素子は、RLEM 2-17 を除き、能力が完全に特徴づけられた。この結果は、ロータリー素子とそれによる可逆チューリング機械の構成法のユニークさと共に、国際会議でも反響を呼んだ (学会発表 4, 15)。

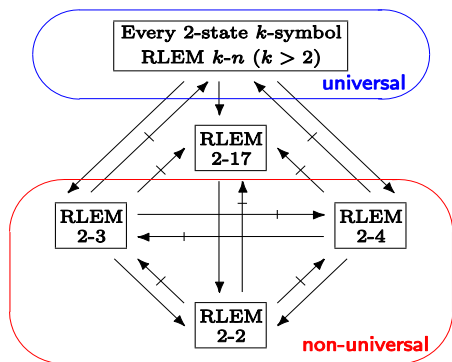


図 3. 2 状態可逆論理素子(RLEM)の能力の階層と万能性/非万能性。

一方、4 記号以下の任意の RLEM が、可逆的な物理モデルであるビリヤードボールモデルによって簡潔にシミュレートできるという結果を与えた (雑誌論文 5, 学会発表 16)。この結果は、これら素子の物理的実現の容易性を示唆する。

(2) 可逆チューリング機械およびそれに関連する可逆計算モデルの計算能力

本研究では、は補助記憶量が制限された可逆チューリング機械とそれに関連する可逆計算モデルの能力の特徴づけを研究した。まず、 $S(n)$ 領域限定可逆チューリング機械というのは、長さ n の入力に対して、使用できる補助記憶テープのます目が高々 $S(n)$ 個に限定された機械である (図 4)。

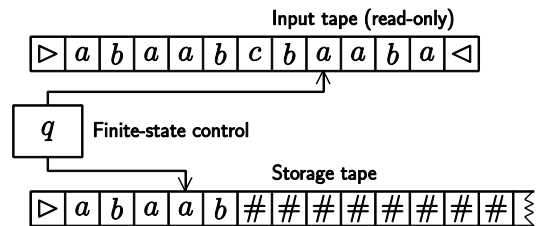


図 4. 2 テープ・チューリング機械。

ここで、 $S(n) = \log n$ であるようなチューリング機械の族がマルチヘッド有限オートマトン(MFA)の族と等能力であることは古くから知られている。後者は、図 5 のように、入力を読み取るヘッドを有限個もつオートマトンで、構造が単純でありながら比較的高い能力をもつ。

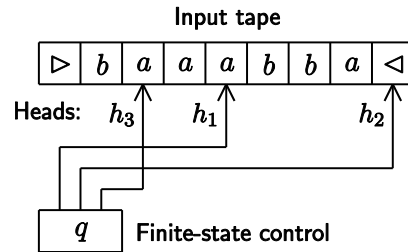


図 5. マルチヘッド有限オートマトン。

本研究ではまず、ヘッドが左右 2 方向に動くことができる可逆 MFA の基本的性質を明らかにした (雑誌論文 7, 学会発表 10)。さらに、2 方向で非可逆な MFA が与えられたとき、ヘッド数を増やさずにそれと等価な 2 方向可逆 MFA に変換できる、すなわち可逆性の制約を加えても計算能力が下がらないことを証明した (学会発表 1)。この結果は、同じ学会で Kutrib, Malcher が発表した、1 方向 MFA の場合には可逆性制約を加えると能力が下がるという結果と対照的なものであり、同学会でも注目を集めた。

次に上記の方法、つまり 2 方向非可逆 MFA

を2方向可逆MFAでシミュレートする方法をチューリング機械に応用して次の結果を得た： $S(n)$ 領域限定非可逆チューリング機械は、同じテープ記号数の $S(n)$ 領域限定可逆チューリング機械によってシミュレートできる。これと類似の結果は Lange, McKenzie, Tapp (2000)によって示されているが、彼らの方法は非常に複雑で、テープ記号数も大幅に増やす必要がある。それに対して本研究での方法は単純明快であり、テープ記号数も同数に保てる。本手法は、記憶量が制限された可逆計算機構の能力を特徴づける方法として、今後も重要な基礎になると考えられる。

(3) 可逆セルオートマトンの性質と万能性

本研究では、計算万能性を有する1次元可逆セルオートマトン(CA)がどれほど単純化できるのかという問題を研究した。計算万能な可逆CAを構成する方法はいくつかあるが、ここでは可逆チューリング機械をシミュレートする方法と、計算万能性が知られているサイクリックタグシステム(CTS)をシミュレートする方法を用いて状態数の少ないものを得た。

まず、可逆チューリング機械をシミュレートする方法により、次の結果を得た：任意の m 状態 n 記号の1テープ可逆チューリング機械に対して、それをシミュレートする高々 $(m+2n+1)(m+n+1)$ 状態の1次元2近傍可逆CAを構成できる(雑誌論文8, 学会発表18)。この結果は、 m 状態 n 記号の1テープ可逆チューリング機械に対して $2n(m+1)^2$ 状態の1次元3近傍可逆CAが構成できるというMorita (2008)による従来の結果を状態数と近傍数の両方で改善するものとなっている。

次にCTSをシミュレートできる24状態の1次元2近傍可逆CAを与えた(雑誌論文8)。このCAは初期状態(時刻0におけるセル空間全体の状態)を適切に設定することにより任意のCTSをシミュレートすることができる(図6)。非可逆な場合には2状態の1次元3近傍CAで任意のCTSがシミュレートできるというCook (2004)の結果が知られており、それに比べると状態数が多いが、可逆CAとしては状態数がかなり少ない。状態数をさらに少なくすることは今後の課題である。

可逆CAに関しては、上記の成果以外に、本研究全体をサーベイした発表とした、論文1件(雑誌論文1), 学会での招待講演2件(学会発表5, 19), 分担執筆図書2件(図書1, 3)がある。

なお、雑誌論文8は、SciVerse-ScienceDirectによるTop 25 Hottest ArticlesのTheoretical Computer Science誌ランキングにおいて2011年4-6月期に19位となった。

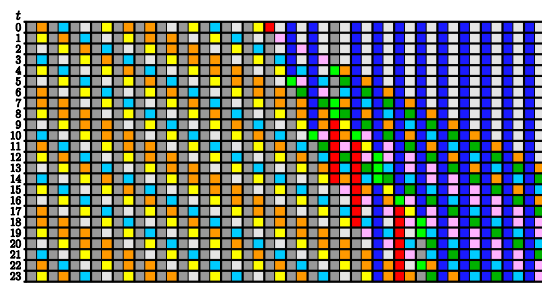


図6. サイクリックタグシステムをシミュレートする計算万能な24状態1次元可逆セルオートマトンの時間発展例。

(4) 可逆コンピューティング理論の体系化

可逆コンピューティングは、マイクロなレベルからマクロなレベルまで、何層かの階層を構成している。つまり、可逆的な物理システムが最も下位つまりマイクロなレベルにあり、その上に可逆論理素子のレベル、可逆論理回路やアーキテクチャのレベルがあり、一番上に(理論的ないし実際の)可逆計算機構のレベルがある。

これら各レベル内での個々の計算モデルの研究も重要だが、モデル間の関係や、下位レベルのシステムによって上位レベルのシステムがどのようにうまく構成できるかという問題なども重要である。これらを含めて、理論全体の体系化が必要である。

本研究では、理論を体系化し、可逆コンピューティングの全体像を描くことを目的として、和文単行本「可逆計算」を執筆・刊行した(図書2)。また、これ以外にも全体のサーベイや解説として、論文2件(雑誌論文2, 9), 招待講演件(学会発表5, 11, 17) 分担執筆図書1件(図書3)がある。

雑誌論文9はSciVerse-ScienceDirectによるTop 25 Hottest ArticlesのElectronic Notes in Theoretical Computer Science誌ランキングにおいて2010年7-9月期に23位となった。また、出版時期が本研究期間の前ではあるが、次のサーベイ論文K. Morita, Reversible computing and cellular automata - A survey, Theoretical Computer Science, Vol. 395, pp. 101-131, 2008. は、同じくTop 25 Hottest ArticlesのTheoretical Computer Science誌ランキングにおいて2008年4-6月期1位, 2008年7-9月期12位, 2009年7-9月期14位, 2010年1-3月期18位, 4-6月期9位, 7-9月期6位, 10-12月期7位, 2011年1-3月期16位, 4-6月期16位と、最近に至るまでしばしば上位に入っており、可逆コンピューティングの体系的な理論に対する海外からの注目度も高い。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

1. K. Morita, Computation in reversible cellular automata (招待論文), Int. J. of General Systems, 査読無, Vol.41, pp.569-581, 2012.
DOI: 10.1080/03081079.2012.695897
2. 森田憲一, 可逆コンピューティング, 情報処理, 査読有, Vol. 53, pp.496-502, 2012.
3. A. Alhazov, R. Freund, K. Morita, Sequential and maximally parallel multiset rewriting: reversibility and determinism, Natural Computing, 査読有, Vol.11, pp.95-106, 2012.
DOI: 10.1007/s11047-011-9267-8
4. K. Morita, R. Wille, Design of reversible and quantum circuit, Dagstuhl Reports, 査読無, Vol.1, pp.47-61, 2012.
DOI: 10.4230/DagRep.1.12.47
5. Y. Mukai, K. Morita, Realizing reversible logic elements with memory in the billiard ball model, J. of Unconventional Computing, 査読有, Vol.8, pp.47-59, 2012.
6. K. Morita, T. Ogiro, A. Alhazov, T. Tanizawa, Non-degenerate 2-state reversible logic elements with three or more symbols are all universal, J. of Mult.-Valued Logic and Soft Computing, 査読有, Vol.37, pp.37-45, 2012.
7. K. Morita, Two-way reversible multi-head finite automata, Fundamenta Informaticae, 査読有, Vol.110, pp.241-254, 2011. DOI: 10.3233/FI-2011-541
8. K. Morita, Simulating reversible Turing machines and cyclic tag systems by one-dimensional reversible cellular automata, Theoretical Computer Science, 査読有, Vol.412, pp.3856-3865, 2011.
DOI: 10.1016/j.tcs.2011.02.022
9. K. Morita, Universality issues in reversible computing systems and cellular automata, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 査読無, Vol.253, pp.23-31, 2010.
DOI: 10.1016/j.entcs.2010.02.004
10. T. Ogiro, A. Alhazov, T. Tanizawa, K. Morita, Universality of 2-state 3-symbol reversible logic elements — A direct simulation method of a rotary element, Proceedings in Information and Communications Technology, Springer Japan, 査読有, Vol.2, pp.206-213, 2010.
11. A. Alhazov, K. Morita, On reversibility

and determinism in P systems, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 査読有, Vol. 5957, pp.158-168, 2010.

[学会発表] (計 19 件)

1. K. Morita, A deterministic two-way multi-head finite automaton can be converted into a reversible one with the same number of heads, 4th Workshop on Reversible Computation, 2012年7月2日, Copenhagen (Denmark).
2. 向井優太, 森田憲一, 記憶付き可逆論理素子の能力の階層構造について, 2011年度冬のLAシンポジウム, 2012年1月31日, 京都.
3. K. Morita, Universality of 1-D reversible number-conserving cellular automata, International Meeting on Cellular Automata, 2012年1月13日, 寝屋川.
4. K. Morita, Reversible logic elements with memory, Dagstuhl Seminar on Design of Reversible and Quantum Circuits, 2011年12月14日, Schloss Dagstuhl (Germany).
5. K. Morita, Reversible computing and cellular automata as complex systems, Int. Workshop on Complex Systems as Computing Models (招待講演), 2011年11月9日, Mexico City (Mexico).
6. 長岡勇介, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, チューリングマシンを直接模倣する可逆セルオートマトン, 平成23年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011年10月22日, 広島.
7. 伊吹拓也, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, 記憶付き可逆論理素子と可逆論理ゲートの分類, 平成23年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011年10月22日, 広島.
8. 池田隼人, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, サイクリックタグシステムの適切な符号化による3記号万能可逆チューリングマシンの小サイズ化, 平成23年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011年10月22日, 広島.
9. 向井優太, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, 2記号記憶付き可逆論理素子の万能性, 平成23年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2011年10月22日, 広島.
10. K. Morita, Reversible multi-head finite automata and languages accepted by them, 3rd Workshop on Reversible Computation, 2011年7月4日, Gent (Belgium).
11. K. Morita, Reversible computing — Towards utilizing Nature's process for computing, 1st International Conference

- on Networking and Computing (招待講演), 2010年11月17日, 広島.
12. 向井優太, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, 記憶付き可逆論理素子のビリヤードボールモデル上での実現, 平成22年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日, 総社.
 13. 池田隼人, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, 小サイズ3記号万能可逆チューリングマシンの構築, 平成22年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日, 総社.
 14. 長岡勇介, 森田憲一, 岩本宙造, 今井克暢, 可逆セルオートマトンによる可逆チューリングマシンのシミュレーション, 平成22年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2010年10月23日, 総社.
 15. K. Morita, T. Ogiro, A. Alhazov, T. Tanizawa, Non-degenerate 2-state reversible logic elements with three or more symbols are all universal, 2nd Workshop on Reversible Computation, 2010年7月2日, Bremen (Germany).
 16. Y. Mukai, K. Morita, Realizing reversible logic elements with memory in the billiard ball model, The UC 2010 Hypercomputation Workshop (HyperNet 10), 2010年6月22日, 東京.
 17. 森田憲一, 可逆コンピューティングとセルオートマトン, イノベティブコンピューティング調査研究会・講演会, 2009年12月12日, 神戸.
 18. K. Morita, Simulating reversible Turing machines by 1-dimensional reversible cellular automata, 15th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, 2009年10月12日, Sao Jose dos Campos (Brazil).
 19. K. Morita, Computation in reversible cellular automata, 15th International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming (招待講演), 2009年6月11日, Fayetteville (USA).

[図書] (計3件)

1. G. Rozenberg, T. Baeck, J.N. Kok (eds.), Handbook of Natural Computing ("Reversible cellular automata" by K. Morita を執筆), Springer-Verlag, p.2100, 2012 (印刷中).
2. 森田憲一, 可逆計算, 近代科学社, p.212, 2012.
3. R.A. Meyers (ed.), Encyclopedia of Complexity and Systems Science ("Reversible cellular automata" by K. Morita, pp.7679-7695, and "Reversible

computing" by K. Morita, pp.7695-7712 の2項目を執筆), Springer-Verlag, p.10370, 2009.

[その他]

ホームページ等

1. 森田憲一, 可逆計算, 2012 [図書2] の一部. <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00032372>
2. K. Morita, Design of Reversible and Quantum Circuits, Dagstuhl Seminar 11502, Schloss Dagstuhl, Germany, 2011. <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00032376>
3. K. Morita, K. Imai, Self-reproduction in two- and three-dimensional reversible cellular automata, 2011. <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00031368>
4. K. Morita, Universal reversible cellular automata in which counter machines are concisely embedded, 2011. <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00031367>
5. K. Morita, Constructing a reversible Turing machine by a rotary element, a reversible logic element with memory, 2010. <http://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/00029224>

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 憲一 (MORITA KENICHI)
 広島大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：00093469

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし